

### ปัญหา, อุปสรรค และวิธีการแก้ไขของการนำเถ้าถ่านหิน ไปใช้ในงานคอนกรีต

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล                      เอนก ศิริพานิชกร  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สุรพล พุกษานุกุล  
บริษัท ทอรัสพอสโซลานซ์ จำกัด

\*\* ที่มา: เนื้อหาส่วนใหญ่มาจากเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “การนำเถ้าถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต” เมื่อวันที่ 29 เมษายน 2546 ณ ห้องประชุมคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 93-103 สนับสนุนโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน

#### 1. บทนำ

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยมีการนำไปใช้ในการก่อสร้างคอนกรีตอย่างแพร่หลายและมากขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่วง 8 ปีที่ผ่านมา แม้ว่าวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ได้ออกหนังสือเรื่อง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต [1] แต่หนังสือดังกล่าวจะเน้นการให้ความรู้เบื้องต้นของการใช้เถ้าถ่านหินเป็นหลัก ไม่ได้กล่าวถึงปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะเจาะจง

ปัญหาของการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตที่พบบ่อยมักเกิดขึ้นซ้ำๆกัน ซึ่งปัญหาเหล่านั้นในหลายๆครั้งสามารถป้องกันหรือแก้ไขได้โดยง่าย หากผู้ใช้งานเข้าใจเรื่องของเถ้าถ่านหินดีพอ แต่ปัญหาบางประการก็ไม่สามารถแก้ไขได้แต่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาได้ ดังนั้นการทำความเข้าใจกับปัญหาต่างๆที่จะเกิดขึ้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจสำหรับผู้ที่จะนำเถ้าถ่านหินไปใช้ในงานคอนกรีต เพราะช่วยให้หลีกเลี่ยงปัญหาและทำให้ได้คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีคุณภาพดีตามที่ต้องการ

### 2. ปัญหาที่พบบ่อยของการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีต

**ปัญหา** จะรู้ได้อย่างไรว่าเถ้าถ่านหินที่จะนำไปใช้งานเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี

**คำตอบ** ข้อมูลที่ใช้ประกอบเพื่อตัดสินใจว่าจะใช้เถ้าถ่านหินจากแหล่งใดๆก็คือ คุณสมบัติทางเคมี และทางด้านกายภาพ ซึ่ง ASTM C 618 [2] ได้แนะนำเอาไว้ดังนี้

คุณสมบัติทางด้านเคมีได้แก่ปริมาณของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$ , Loss On Ignition (LOI),  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ASTM C 618 [2] ไม่ได้แนะนำให้หาปริมาณของ CaO ว่าควรมีเท่าใดจึงจะเหมาะสมหรือเพียงพอ เพียงแต่บอกว่าถ้า CaO สูง (มักเกินร้อยละ 10) มีแนวโน้มว่าเถ้าถ่านหินดังกล่าวจะเป็น Class C และถ้า CaO ต่ำกว่าร้อยละ 10 มักพบว่าเถ้าถ่านหินดังกล่าวเป็น Class F หากเถ้าถ่านหินมีปริมาณ CaO สูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะช่วยในการยึดประสานได้บ้างคล้ายกับปูนซีเมนต์ แต่การมี CaO สูงมากๆ มักจะไม่ค่อยดีเพราะอาจมีปัญหาด้านการขยายตัวเนื่องจากปูนขาวอิสระได้ แม้ว่าจะแบ่งเถ้าถ่านหินออกเป็น 2 ประเภท แต่เถ้าถ่านหินทั้ง Class F และ Class C มีการนำมาใช้งานคอนกรีตอย่างแพร่หลายทั้งคู่ และไม่ได้บอกว่าเถ้าถ่านหิน Class F หรือ Class C ดีกว่ากัน

$\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ช่วยในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งต้องมีไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 เถ้าถ่านหินที่มี  $\text{SO}_3$  มากเกินกว่าร้อยละ 5 อาจทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวสูงและเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตได้ง่าย LOI ที่สูงมักทำให้คอนกรีตต้องการสารกักกระจายฟองอากาศเพิ่มขึ้นเพื่อให้คอนกรีตมีฟองอากาศตามที่ต้องการ (สารกักกระจายฟองอากาศใช้สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพอากาศหนาวถึงหนาวจัด หรือมีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ LOI. ยังทำให้คอนกรีตมีกำลังต่ำลง ดังนั้น ASTM C 618 [2] จึงกำหนดไว้ว่าไม่ควรมีเกินกว่าร้อยละ 6 ขณะที่  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  เป็นค่าที่อาจทำปฏิกิริยากับหินหรือทรายบางชนิดและก่อให้เกิดปัญหาการขยายตัวของคอนกรีตได้ง่ายถ้ามีปริมาณสูงเกินไป ดังนั้นจึงกำหนดให้มีไม่เกินร้อยละ 1.5 เทียบเท่ากับของ  $\text{Na}_2\text{O}$  แต่ข้อกำหนดของ  $\text{Na}_2\text{O}$  จะใช้ก็ต่อเมื่อคาดว่าคอนกรีตจะเกิดปัญหาของการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างต่าง ( $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$ ) กับมวลรวมบางชนิด

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเถ้าถ่านหินคือ ความละเอียด รูปร่าง และการไม่เป็นผลึก

เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากสามารถทำปฏิกิริยาได้เร็ว และให้กำลังแก่คอนกรีตสูงเนื่องจากทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ ขณะที่เถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้หมดทั้งอนุภาค จากการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมพบว่าเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงมากๆ (อนุภาคผ่านตะแกรงมาตรฐาน 325 ทั้งหมด) สามารถนำมาใช้แทนซิลิกาฟูมในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้อย่างดี

เถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างกลม ดัน ย่อมทำให้คอนกรีตลื่นไหลได้ดีขึ้นและใช้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตลดลงเป็นผลให้คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง และส่งผลให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้น ในทาง

ตรงกันข้าม แก้วถ่านหินที่มีรูปร่างไม่แน่นอน และ กลวง ย่อมมีการดูดน้ำเข้าสู่อนุภาคและต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น

แก้วถ่านหินที่ดีต้องไม่เป็นผลึกหรือมีผลึกอยู่น้อย ดังนั้นจึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้อย่างดี เนื่องจากการทดสอบความเป็นผลึกของแก้วถ่านหินขณะนี้ทำได้ยากและใช้เวลานาน วิธีที่ง่ายในขณะนี้คือการนำแก้วถ่านหินที่ต้องการทดสอบไปแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จากนั้นผสมกับทรายโดยมีสัดส่วน วัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์บวกแก้วถ่านหิน)ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก หล่อเป็นมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม<sup>3</sup> โดยใช้น้ำในส่วนผสมซึ่งทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 105-115 ทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน แก้วถ่านหินที่ดีจะมีกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมแก้วถ่านหินที่สูงกว่าร้อยละ 75 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐานซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว รายละเอียดการทดสอบสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก ASTM C 618 [2]

อย่างไรก็ตามข้อเสนอแนะดังกล่าวเป็นข้อเสนอแนะทั่วไปซึ่งใช้ได้กับแก้วถ่านหินส่วนใหญ่ แต่อาจมีแก้วถ่านหินจากบางแหล่งที่มีลักษณะแตกต่างออกไป และยังให้คุณภาพของคอนกรีตที่ดีได้ ในกรณีดังกล่าวผู้ใช้งานควรทดสอบแก้วถ่านหินด้วยการหล่อคอนกรีตโดยตรง

**ปัญหา** การใช้แก้วถ่านหินผสมในคอนกรีตทำให้เกิดการเยิ้มน้ำมากขึ้นกว่าคอนกรีตทั่วไป และทำให้คอนกรีตมีคุณภาพต่ำลง

**คำตอบ** การเยิ้มน้ำที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่ผสมหรือไม่ผสมแก้วถ่านหินเป็นเรื่องปกติที่เกิดขึ้นของคอนกรีต และถือว่าการเยิ้มน้ำเป็นการแยกตัวชนิดหนึ่งของคอนกรีต โดยทั่วไปพบว่าการใช้แก้วถ่านหินในงานคอนกรีตจะลดการเยิ้มน้ำในคอนกรีตมากกว่าเพิ่มการเยิ้มน้ำ [3] เพราะแก้วถ่านหินมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์และการใช้แก้วถ่านหินในคอนกรีตสามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสมได้ทำให้ใช้น้ำน้อยลง จึงลดการเยิ้มน้ำของคอนกรีต

อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้แก้วถ่านหินในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ทำให้เกิดการเยิ้มน้ำมากขึ้น เพราะแก้วถ่านหินมีความกลม ดัน และมีผิวเรียบกว่าเม็ดปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อใช้ในปริมาณที่สูงๆ จึงเกิดการเยิ้มน้ำมากขึ้น

การแก้ไขปัญหาที่ดีคืออย่าใช้แก้วถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีตที่มากเกินไป และเมื่อเทคอนกรีตเสร็จเรียบร้อยแล้ว ควรปล่อยให้คอนกรีตเกิดการเยิ้มน้ำขึ้น จากนั้นเมื่อการเยิ้มน้ำเริ่มลดลงหรือหยุดจึงทำการตบแต่งผิวหน้าคอนกรีตให้แน่นขึ้น ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้ในการแก้ปัญหาการเยิ้มน้ำของคอนกรีตได้อยู่แล้วตามปกติ

**ปัญหา** การใช้เถาผ่านหินผสมในคอนกรีตทำให้ผิวหน้าคอนกรีตมีความแข็งแรงน้อยลง ดังนั้นจึงเกิดการสึกกร่อนเนื่องจากการขัดสีได้ง่าย

**คำตอบ** ความต้านทานการขัดสีของคอนกรีต (ทั้งที่ผสมและไม่ผสมเถาผ่านหิน) ขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต และคุณภาพของมวลรวม (ทรายและหิน) ที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเป็นหลัก งานวิจัยจากต่างประเทศ [3] พบว่า คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากัน มีการตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตที่เหมาะสม และบ่มอย่างเต็มที่ พบว่าคอนกรีตที่ผสมและไม่ผสมเถาผ่านหินมีความต้านทานการสึกกร่อนที่เท่ากัน

การที่คอนกรีตผสมเถาผ่านหินแล้วมีการสึกกร่อนสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถาผ่านหิน แสดงว่าผิวหน้าของคอนกรีตที่ผสมเถาผ่านหินมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าผิวหน้าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถาผ่านหิน นอกจากนี้การเกิดการเข้มน้ำในคอนกรีตซึ่งมักเกิดที่ผิวหน้าคอนกรีตจะทำให้บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) สูงขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตตรงผิวหน้ามีกำลังอัดที่ต่ำลง จึงเกิดการสึกกร่อนได้ง่ายขึ้น จึงควรตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตที่เกิดการเข้มน้ำให้แน่น เพื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ตรงบริเวณผิวหน้าคอนกรีตให้ต่ำลง

**ปัญหา** เกิดการหลุดร่อน หรือ ผิวหน้าเป็นผง ของงานถนนที่ใช้คอนกรีตผสมเถาผ่านหิน

**คำตอบ** กรณีดังกล่าวมักเกิดขึ้นเนื่องจากผิวหน้าของคอนกรีตไม่แข็งแรงพอ ซึ่งเป็นผลจากการเข้มน้ำของคอนกรีต ทำให้ผิวหน้าคอนกรีตมีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงมาก กำลังของคอนกรีตจึงต่ำกว่าที่กำหนด อีกสาเหตุเกิดจากกำลังของคอนกรีตที่ใช้เถาผ่านหินยังไม่สูงเพียงพอต่อการใช้งานในขณะนั้น เนื่องจากอายุคอนกรีตยังน้อยและพัฒนากำลังไม่เต็มที่ การแก้ไขควรทำดังนี้คือ หลังจากเทคอนกรีตไปแล้ว ในช่วงที่กำลังจะแข็งตัวให้ทำการตกแต่งผิวหน้าเพื่อเอาน้ำที่ผิวออก จะทำให้ผิวหน้าคอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้น และต้องทำการบ่มให้พอเพียงตามอายุที่ต้องการใช้งาน อีกทั้งต้องออกแบบกำลังอัดให้เหมาะสมกับอายุที่จะเปิดการใช้งานด้วย

**ปัญหา** เกิดการแตกร้าว หรือ การไม่แข็งตัวของคอนกรีตที่ใช้เถาผ่านหิน

**คำตอบ** เถาผ่านหินมีวัสดุอื่นปนมาเนื่องมาจากการขนส่ง ทำให้คุณภาพของคอนกรีต ไม่ได้ตามมาตรฐานหรือไม่สามารถใช้งานได้ การแก้ไข รถขนส่งจะต้องทำความสะอาดไม่ให้มีวัสดุอื่นตกค้าง ก่อนนำมาขนเถาผ่านหิน นอกจากนี้การใช้เถาผ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงๆอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตไม่แข็งตัว เช่นมีการใช้เถาผ่านหินจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จและมาเติมที่หน้างานก่อนเทอีกครั้ง ทำให้ปริมาณเถาผ่านหินในส่วนผสมคอนกรีตสูงมากจนเกิดปัญหาข้างต้น

ในกรณีที่คอนกรีตไม่แข็งตัว อาจเกิดจากการใช้จากแหล่งที่เถื่อนหินมีปฏิกิริยาที่เกิดจากกระบวนการเผาปูนขาวเพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

คอนกรีตที่ผสมเถื่อนหินมีระยะเวลาการก่อตัวที่นานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถื่อนหิน ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมเถื่อนหินจึงต้องรอเวลาให้นานขึ้นกว่าปกติก่อนที่จะทำการตกแต่งผิวหน้าคอนกรีต การตกแต่งผิวหน้าคอนกรีตที่เร็วเกินไปทำให้ผิวหน้าคอนกรีตปิดทางเดินของน้ำที่จะซึมเข้าสู่ผิวหน้าคอนกรีต ทำให้ผิวหน้าส่วนบนมีน้ำมากและทำให้ผิวหน้าคอนกรีตอ่อนแอ นอกจากนี้ระยะเวลาการก่อตัวที่นานขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวพลาสติก (Plastic Shrinkage) ได้ง่ายขึ้น หรือมีการระเหยของน้ำออกจากผิวหน้าคอนกรีตมากเกินไปทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวหน้าคอนกรีตได้ง่ายขึ้นเช่นกัน [3]

การแตกร้าวของคอนกรีตที่ใช้เถื่อนหินเป็นส่วนผสมอาจเกิดขึ้นได้ หากแหล่งที่มาของเถื่อนหินดังกล่าวมีการนำวัสดุอื่น ๆ ที่เป็นของเสีย (Waste) ไปเผาพร้อมเป็นเชื้อเพลิงกับถ่านหิน ซึ่งอาจทำให้คอนกรีตที่ใช้เถื่อนหินจากแหล่งดังกล่าวเกิดการบวมและแตกร้าว เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปจากเดิม

เพื่อป้องกันปัญหาการแตกร้าวหรือการไม่แข็งตัวของคอนกรีตที่ใช้เถื่อนหินในส่วนผสม จึงต้องทดสอบเถื่อนหินก่อนนำไปใช้งานว่ามีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานที่เชื่อถือได้ และ/หรือใช้เถื่อนหินจากแหล่งที่เชื่อถือได้

**ปัญหา** คอนกรีตผสมเถื่อนหินเกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวอย่างรวดเร็วกว่าคอนกรีตธรรมดา

**คำตอบ** โดยทั่วไปแล้ว คอนกรีตที่ผสมเถื่อนหินมักมีค่าการสูญเสียค่ายุบตัวที่น้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่ถ้าคอนกรีตผสมเถื่อนหินเกิดการสูญเสียค่าการยุบตัวอย่างรวดเร็วกว่าคอนกรีตธรรมดามักเกิดขึ้นเนื่องจากเถื่อนหินที่นำมาใช้มีความพรุนสูงจึงดูดน้ำเข้าไปในอนุภาคทำให้น้ำในส่วนผสมหายไปและเกิดการสูญเสียค่ายุบตัวเร็วขึ้นกว่าคอนกรีตปกติ

การสูญเสียค่ายุบตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้การทำงานของคอนกรีตยากขึ้น หากการใช้เถื่อนหินในบางแหล่งที่เกิดปัญหานี้ ต้องควบคุมคุณภาพของคอนกรีตให้ดี จะช่วยลดปัญหาลงได้ หรือจำเป็นต้องลดปริมาณการใช้เถื่อนหินลง หรือเพิ่มปริมาณพลาสติคในคอนกรีต นอกจากนี้หากที่หน้างาน ได้จัดเตรียมสารลดน้ำพิเศษหรือซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ (Type G) ไว้สำหรับเติมเพื่อเพิ่มค่าการยุบตัวของคอนกรีตจะทำให้การทำงานเพื่อแก้ปัญหานี้ง่ายขึ้น

**ปัญหา** การใช้เถื่อนหินในงานคอนกรีตทำให้การรับแรงกระแทกของคอนกรีตลดลงอย่างมาก จริงหรือไม่?

**คำตอบ** การรับแรงกระแทกของคอนกรีตทั้งที่ผสมหรือไม่ผสมเถื่อนหินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ยึดหินของคอนกรีตนั้น และคุณภาพของหินที่ผสมคอนกรีต มอร์ตาร์และหินที่

แข็งแรงจะทำให้คอนกรีตรับแรงกระแทกได้สูง ดังนั้นการใช้เถ้านหินผสมในคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับว่าคอนกรีตที่พิจารณามีกำลังอัดประลัยที่สูงหรือต่ำ เป็นสำคัญ (ถ้าหากใช้หินที่มีความแข็งแรงเท่ากัน) หากมีกำลังอัดประลัยสูงกว่าย่อมรับแรงกระแทกได้สูงกว่าคอนกรีตทั่วไปซึ่งไม่ใส่เถ้านหิน

**ปัญหา** เนื่องจากกำลังอัดที่อายุต้น (ไม่เกิน 7 วัน) ของคอนกรีตผสมเถ้านหินมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้านหิน จะมีวิธีแก้ไขอย่างไร

**คำตอบ** หากต้องการเร่งกำลังอัดที่อายุต้น เช่น ที่อายุ 3 หรือ 7 วัน ของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินให้เร็วขึ้นสามารถทำได้โดยใช้สารเคมีเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต หรือใช้สารลดปริมาณน้ำซึ่งจะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตต่ำลงเป็นผลให้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้านหินสูงขึ้น

งานวิจัยบางชิ้น เสนอว่าให้ใช้ซิลิกาฟูมร่วมกับเถ้านหินในส่วนผสมคอนกรีตที่มีเถ้านหินเพื่อช่วยเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตในช่วงอายุต้น นอกจากนี้คอนกรีตดังกล่าวยังมีกำลังที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงอายุที่ 56 หรือ 91 วัน สำหรับงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พบว่าการเร่งกำลังของคอนกรีตที่อายุต้นหากไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มสามารถทำได้โดยใช้เถ้านหินที่มีความละเอียดสูงขึ้น (ซึ่งอาจได้จากการบดหรือแยกขนาดให้ละเอียดขึ้น) สามารถเร่งกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้น (ราว 7 หรือ 14 วัน) จนมีกำลังอัดเท่ากับหรือสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้านหิน (การแทนที่ไม่เกินร้อยละ 35 ของน้ำหนักวัสดุประสาน) อย่างไรก็ตาม หากใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราที่สูงมากกว่าร้อยละ 35 หรือ 50 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้นต่ำมากและการใช้สารเคมีผสมเพิ่มหรือใช้เถ้านหินที่มีความละเอียดสูง ก็อาจไม่เพียงพอที่จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตดังกล่าวสูงเทียบเท่ากับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้านหิน

**ปัญหา** คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินไม่สามารถตัดลวดสำหรับทำคอนกรีตอัดแรงได้ตามเวลาที่กำหนดดังเช่นคอนกรีตทั่วไป เพราะเหล็กเกิดการรูดได้ง่ายกว่า แสดงว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตผสมเถ้านหินมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปมาก

**คำตอบ** แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับ กำลังของคอนกรีต, พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กกับคอนกรีต, ตำแหน่งของเหล็ก (รับแรงดึงหรือแรงอัด), และความหนาแน่นของคอนกรีต เป็นต้น

เมื่อกำหนดส่วนผสมต่างๆที่เหมือนกัน คอนกรีตที่ใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน จะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตไม่ผสมเถ้านหินเมื่ออายุไม่เกิน 28 วัน (ยกเว้นว่ามีการปรับปรุงคุณภาพของเถ้านหิน หรือใช้สารลดน้ำหรือสารผสมเพิ่มเข้าช่วย) แต่เนื่องจากการตัดลวดเหล็กแรงดึงสูงมักกระทำที่อายุคอนกรีตต้นๆ เช่นที่อายุ 1 ถึง 3 วัน ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีต ดังนั้นหากตัดหรือดึงลวดตามวิธีที่ปฏิบัติ

สำหรับคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินก็จะพบว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตลดลง ดังนั้นจึงควรปล่อยเวลาที่ตัดลวดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินให้นานกว่าปกติ (ซึ่งอาจไม่ใช่วิธีที่ดีในงานคอนกรีตอัดแรง)

งานวิจัยจากต่างประเทศให้ความเห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน ถ้าหากคอนกรีตทั้งคู่มีกำลังอัดเท่าๆกัน

**ปัญหา** การใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป ทำให้การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปอาจใช้ไม่ได้

**คำตอบ** งานวิจัยของ Lane และ Best [4] พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปเล็กน้อยที่อายุต้น (ก่อน 28 วัน) และสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปเล็กน้อยที่อายุมากขึ้น ดังนั้นการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้หลักการที่ใช้สำหรับคอนกรีตทั่วไปสามารถดำเนินการได้โดยไม่มีปัญหาอะไร และสิ่งที่ควรเข้าใจอีกประการหนึ่งของเรื่องนี้ก็คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ผสมหรือไม่ผสมเถ้าถ่านหินจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตเป็นหลัก คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสูงขึ้นตามกำลังอัดที่มากขึ้น นอกจากนี้ผลกระทบของเถ้าถ่านหินต่อค่าโมดูลัสของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าผลกระทบเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินจะส่งผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีตอย่างมาก

**ปัญหา** จากที่ได้รับฟังมาพบว่าเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุพอซโซลานที่ดี สามารถช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ แสดงว่ายิ่งใส่เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์มากยิ่งขึ้นทำให้คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีคุณภาพดียิ่งขึ้น ใช่หรือไม่

**คำตอบ** ถ้าใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปจะส่งผลเสียต่อคอนกรีตมากกว่าผลดี เหตุผลคือเถ้าถ่านหินไม่ใช่ปูนซีเมนต์ หากนำเถ้าถ่านหินผสมกับน้ำแล้วทิ้งไว้ 1 หรือ 2 คืน จะพบว่าเถ้าถ่านหินเกือบไม่แข็งตัว หรือมีการแข็งตัวน้อยมาก (ในกรณีที่เถ้าถ่านหินมี CaO สูง) ขณะที่เอาปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ พบว่าการแข็งตัวภายใน 24 ชั่วโมง

เนื่องจากเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุพอซโซลาน จึงต้องอาศัยค่าจางแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มาจากปูนซีเมนต์เพื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับส่วนประกอบอื่นๆที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินและสร้างวัสดุประสานขึ้นมาใหม่ ซึ่งวัสดุประสานที่สร้างขึ้นมาเมื่อมีจำนวนและอายุมากขึ้นจึงมีความแข็งแรงสูงขึ้น และส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งหากใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เหมาะสมสามารถให้กำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน

ในทางตรงกันข้าม หากใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไป ค่าผสมเคมีไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ไม่เพียงพอที่จะให้ส่วนประกอบในเถ้านหินได้ทำปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ จึงทำให้เหลือเถ้านหินที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา และส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่ต่ำลง ดังนั้นการใช้เถ้านหินจึงต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งยังขึ้นอยู่กับชนิดและความละเอียดของปูนซีเมนต์ ชนิดและความละเอียดของเถ้านหิน เป็นต้น

การลองผสมคอนกรีตที่มีเถ้านหินในส่วนผสมเพื่อทดสอบคุณภาพกำลังอัดของคอนกรีตที่จะใช้งานเป็นสิ่งที่สำคัญ และควรทำอย่างขี้ใจ โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีข้อมูลของเถ้านหินจากแหล่งที่ต้องการใช้งาน

**ปัญหา** การก่อตัวที่ช้าลงของคอนกรีตผสมเถ้านหินส่งผลอย่างไรบ้างต่องานคอนกรีต

**คำตอบ** การใช้เถ้านหินแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์หรือคอนกรีตยัดออกไปเนื่องจากเถ้านหินจะหน่วงการทำปฏิกิริยาของ  $C_3S$  ในปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ส่วนผสมคอนกรีตดังกล่าวยังมีปูนซีเมนต์ (หรือ  $C_3S$ ) ที่น้อยลงด้วย จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวนานขึ้น

อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยังขึ้นกับอุณหภูมิของคอนกรีตและสภาพแวดล้อม, ชนิดของปูนซีเมนต์, ชนิดของเถ้านหิน, ความละเอียดของเถ้านหิน, ปริมาณการแทนที่, ปริมาณน้ำในเพสต์, การใช้น้ำยาเคมีในคอนกรีต, องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหิน ฯลฯ หากระยะเวลาการก่อตัวในคอนกรีต เป็นเรื่องสำคัญ ควรทำการทดสอบก่อนนำไปใช้งานจริง สิ่งที่ต้องระวังเพิ่มเติมเนื่องจากระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตยัดออกไปเนื่องจากการใช้เถ้านหินก็คือ ถ้าความสามารถในการเทของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินเพิ่มขึ้น มีค่าความสูญเสียการยุบตัวน้อยลง และคอนกรีตมีระยะเวลาการก่อตัวที่นานขึ้น จะทำให้แรงดันภายในแบบหล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นแบบหล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินจึงต้องมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย

**ปัญหา** เถ้านหินแต่ละแหล่งหรือในบางช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่างมีสีไม่เหมือนกัน ทำให้คอนกรีตที่ใช้เถ้านหินเป็นส่วนผสมมีสีของเนื้อคอนกรีตไม่เหมือนกัน จะมีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตมากเพียงใด

**คำตอบ** ปัญหานี้เป็นที่เนื้อของเถ้านหินเอง เถ้านหินมีสีแตกต่างกันตามถ่านหินที่นำมาเผา, อุณหภูมิของการเผา, องค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินเพราะสารประกอบบางอย่างให้สีที่แตกต่างกัน เป็นต้น การจะแก้สีของเถ้านหินให้เปลี่ยนไปตามที่ต้องการอาจเป็นเรื่องที่ไม่คุ้มค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงเห็นว่าให้หลีกเลี่ยงการนำเถ้านหินที่มีปัญหาไปใช้ในที่ซึ่งอาจมีปัญหาด้านสีผิวของคอนกรีต



สีของเถ้านหินย่อมส่งผลต่อสีของคอนกรีต โดยเฉพาะในกรณีที่แทนที่ปูนซีเมนต์มาก และส่งผลต่อความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรมและความรู้สึกของบุคคล แต่สีของคอนกรีตที่เปลี่ยนไปมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตค่อนข้างน้อย

การลดปริมาณการใช้เถ้านหินที่มีสีที่แตกต่างกันเพื่อให้สีของเถ้านหินมีผลต่อสีของคอนกรีตน้อยลง หรือ ผสมกับเถ้านหินที่มีสีแตกต่างจากเดิมกับเถ้านหินของเดิมหรือเถ้านหินที่มีสีใกล้เคียงของเดิมเพื่อลดผลกระทบของสีที่เปลี่ยนไปก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ แต่ทำให้กระบวนการผสมคอนกรีตยากลำบากขึ้น

**ปัญหา** การใช้เถ้านหินก่อให้เกิดคราบสีดำเป็นริ้วๆ บนผิวหน้าคอนกรีตทำให้แลดูหน้าเกลียด

**คำตอบ** การที่เถ้านหินมีปริมาณเถ้านที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์อยู่มาก จึงทำให้เมื่อนำไปผสมในคอนกรีตเกิดเป็นคราบสีดำเป็นริ้วๆทำให้ไม่สวยงาม ปัญหานี้จะเกิดได้ง่ายขึ้นในกรณีที่ผสมคอนกรีตที่ค่อนข้างเหลว เพราะเถ้านที่เผาไหม้ไม่หมดหรือเถ้านหินกลวง (Cenospheres) ซึ่งมีน้ำหนักเบาที่สามารถลอยขึ้นมาบนผิวหน้าคอนกรีตทำให้ผิวหน้าคอนกรีตแลดูไม่สวยงาม

นอกจากนี้ในการจุดเตาเพื่อเผาเถ้านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าต้องใช้น้ำมัน คราบดังกล่าวอาจเป็นคราบน้ำมันก็ได้ ดังนั้น การแก้ไขจึงต้องแก้ไขที่ขั้นตอนการเผาเถ้านหินให้สมบูรณ์ และไม่เก็บเถ้านหินภายหลังจากการเริ่มเผาเตาใหม่ๆมาใช้งาน

**ปัญหา** คอนกรีตผสมเถ้านหินจำเป็นต้องบ่มเช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไปหรือไม่

**คำตอบ** คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินต้องการบ่มเช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไป และอาจต้องบ่มนานกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้านหินด้วย เพราะคอนกรีตผสมเถ้านหินต้องมีความชื้นจึงจะสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ดังนั้นการบ่มคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินจึงเป็นเรื่องจำเป็นเช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไป

**ปัญหา** หากจะประมาณค่ากำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้านหินควรใช้ประมาณเท่าไร

**คำตอบ** งานวิจัยพบว่ากำลังดึงของคอนกรีตผสมเถ้านหินสามารถใช้วิธีการประเมินแบบเดียวกับคอนกรีตปกติทั่วไป คือ กำลังดึงมีค่าประมาณร้อยละ 10-15 ของกำลังอัด ในคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้านหินพบว่าที่อายุก่อน 28 วันกำลังดึงของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าร้อยละ 10 ไม่มากนัก และค่อยๆลดลงตามอายุจนมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัด ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับคอนกรีตกำลังสูงที่ไม่มีส่วนผสมของเถ้านหิน

**ปัญหา** หากสนใจจะนำเถ้านหินไปใช้ในโรงงานคอนกรีตที่ดูแลอยู่ ควรเริ่มต้นอย่างไรดี

**คำตอบ** แนะนำว่าควรอ่านเอกสารตามที่ให้ไว้ในเอกสารอ้างอิงด้านล่างเพิ่มเติม สำหรับการทำส่วนผสมคอนกรีต (Mix Design) แนะนำให้ใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้อยู่ประจำมาลองผสมเพื่อทดสอบกำลังอัดว่าได้ตามที่ต้องการหรือไม่ เช่น ใช้เถ้านหินในการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ไปจนถึง 40 เพื่อดูว่ากำลังอัดของคอนกรีตเปลี่ยนไปอย่างไร โดยที่ยังคงรักษาค่าการยุบตัว (Slump) เท่าเดิม ซึ่งอาจสามารถลดคปริมาณน้ำในส่วนผสมลงได้ในกรณีที่ใช้เถ้านหินที่มีอนุภาคกลม-ตัน แต่ถ้าส่วนผสมคอนกรีตต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น แสดงว่าเถ้านหินดังกล่าวมีรูพรุนหรือมีขนาดใหญ่

ภายหลังการทดสอบกำลังอัด ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ที่สำคัญเพื่อใช้ปรับส่วนผสมของคอนกรีตให้ได้กำลังอัดตามที่ต้องการ นอกจากนี้การใช้สารลดปริมาณน้ำ หรือใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) สามารถช่วยเรื่องกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้านหินได้ดี

**ปัญหา** สามารถใช้สารเคมีหน่วงการก่อตัว หรือสารเคมีเร่งการก่อตัว หรือซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ร่วมกับเถ้านหินได้หรือไม่

**คำตอบ** โดยทั่วไปใช้ได้ แต่ก่อนที่จะใช้ขอแนะนำว่าควรลองผสมและทดสอบดูในห้องปฏิบัติการก่อน เพราะน้ำยาหน่วงการก่อตัว, น้ำยาเร่งการก่อตัว, ซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์ และน้ำยาผสมคอนกรีตอื่นๆ มีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ในบางครั้งการเปลี่ยนชนิดของปูนซีเมนต์ (เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นประเภทที่ 3 หรือประเภทที่ 5) อาจส่งผลต่อคอนกรีตที่แตกต่างกันได้อย่างมาก ดังนั้นการทดลองผสมดูก่อนจึงเป็นวิธีที่ปลอดภัยที่สุด

### 3. บทสรุป

ปัญหาและวิธีการแก้ไขที่แนะนำไว้ข้างต้นมักใช้ได้กับเถ้านหินโดยทั่วไป แต่หากเป็นเถ้านหินที่มีคุณสมบัติเฉพาะ วิธีการแก้ปัญหานั้นแนะนำอาจใช้ไม่ได้ผล ดังนั้นจึงขอให้ผู้อ่านและผู้ใช้เถ้านหินได้พิจารณาข้อแนะนำดังกล่าวประกอบกับข้อมูลหรือผลการทดสอบที่มีอยู่ และไม่ได้หมายความว่าเมื่อเกิดปัญหาดังกล่าวขึ้นจะสามารถใช้วิธีการที่เสนอแนะแก้ปัญหานั้นได้ทุกกรณีไป

### 4. เอกสารอ้างอิง

1. อนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, “การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต” วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ พิมพ์ครั้งที่ 1, 2544

2. ASTM C 618, 1997, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards V. 04.02, pp. 294-296.
3. ACI Committee 232.2R-96, 2000, Use of Fly ash in Concrete, ACI Manual of Concrete Practice Part I.
4. Lane, O.R. and Best, J.F., 1982, Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete, Concrete International: Design & Construction, V. 4, No. 7, July, pp. 81-92.